

**О. І. ГАНУС, К. О. СТАРКОВ, В. В. ЧЕРКАШИНА**

## **СКЛАДОВІ ПЕРЕНАПРУГ НА ЕЛЕМЕНТАХ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРА НАПРУГИ**

Розглянуто нелінійну динамічну математичну модель трансформатора напруги та досліджено перенапруги, що виникають на елементах спрощеної схеми заміщення трансформатора напруги при перехідних процесах при поступовому ускладненні даної системи і аналізі чинників, що впливають на величину перенапруг, тривалості та інших параметрах перехідних процесів. Використано переваги апроксимування нелінійності трансформаторів напруги гіперболічним синусом. Визначено математичні вирази для обчислення параметрів перехідних процесів та перенапруг, які виникають при відключенні лінійних та нелінійних індуктивностей від джерел постійних та синусоїдальних напруг. Визначено вплив початкових умов та інших факторів на характер протікання перехідних процесів. Доведено, що рівень можливих перенапруг на котушці індуктивності, обмотках трансформаторів напруги у більшій мірі залежить від співвідношення активних опорів навантаження котушки індуктивності (або трансформатора напруги) і самої обмотки, чим від величини активного опору навантаження. Визначені максимальні рівні перенапруг, які виникають при відключенні трансформатора напруги від джерела синусоїдальної напруги, та їх залежності від моментів відключення. Обґрунтовано, що найбільш важким випадком з точки зору величин перенапруг є той, при якому включення електричного ланцюга з індуктивністю відбувається в момент часу, коли перехідна складова індукції змушена компенсувати максимальне значення індукції сталого режиму, а відключення відбувається через пів періоду після включення. Визначено характер перехідних процесів для тих випадків, коли попередній перехідний процес не був повністю згашеним. Розроблено рекомендацію щодо найбільш ефективного використання методів з короткочасного шунтування навантаження трансформаторів напруги, які найкраще всього можуть ефективно компенсувати перенапруги при перехідних процесах з ненульовими початковими умовами. Результати аналітичних досліджень апробовано по результатам аналізу записів фіксуючих пристроїв під час аварійних процесів у електричних мережах АТ «Харківобленерго» та використано у системі розподілу електричної енергії для підбору конкретного трансформатора напруги для певної конфігурації електричної мережі.

**Ключові слова:** трансформатор напруги, нелінійність, перехідний процес, індукція, перенапруга, шунтування, навантаження, схема заміщення, початкові умови, магнітні характеристики, ферорезонанс, гіперболічний синус, гістерезис

**А. И. ГАНУС, К. А. СТАРКОВ, В. В. ЧЕРКАШИНА**

## **СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ НА ЭЛЕМЕНТАХ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ**

Рассмотрена нелинейная динамическая математическая модель трансформатора напряжения и исследованы перенапряжения, возникающие на элементах упрощенной схемы замещения трансформатора напряжения при переходных процессах при постепенном усложнении данной системы и анализе факторов, влияющих на величину перенапряжений, продолжительности и других параметров переходных процессов. Использованы преимущества аппроксимирования нелинейности трансформаторов напряжения гиперболическим синусом. Определены математические выражения для вычисления параметров переходных процессов и перенапряжений, возникающих при отключении линейных и нелинейных индуктивностей от источников постоянных и синусоидальных напряжений. Определено влияние начальных условий и других факторов на характер протекания переходных процессов. Доказано, что уровень возможных перенапряжений на катушке индуктивности, обмотках трансформаторов напряжения в большей степени зависит от соотношения активных сопротивлений нагрузки катушки индуктивности (или трансформатора напряжения) и самой обмотки, чем от величины активного сопротивления нагрузки. Определены максимальные уровни перенапряжений, возникающих при отключении трансформатора напряжения от источника синусоидального напряжения, и их зависимости от моментов отключения. Обосновано, что наиболее тяжелым случаем с точки зрения величин перенапряжений является тот, при котором включение электрической цепи с индуктивностью происходит в момент времени, когда переходная составляющая индукции вынуждена компенсировать максимальное значение индукции постоянного режима, а отключение происходит через пол периода после включения. Определен характер переходных процессов для тех случаев, когда предыдущий переходный процесс не был полностью завершен. Разработаны рекомендации по наиболее эффективному использованию методов по кратковременному шунтированию нагрузки трансформаторов напряжения, которые лучше всего могут эффективно компенсировать перенапряжения при переходных процессах с ненулевыми начальными условиями. Результаты аналитических исследований апробированы по результатам анализа записей фиксирующих устройств при аварийных процессах в электрических сетях АО «Харьковоблэнерго» и использованы в системе распределения электрической энергии для подбора конкретного трансформатора напряжения для определенной конфигурации электрической сети.

**Ключевые слова:** трансформатор напряжения, нелинейность, переходный процесс, индукция, перенапряжение, шунтирование, нагрузка, схема замещения, начальные условия, магнитные характеристики, феррорезонанс, гиперболический синус, гистерезис

**A. I. GANUS, K. A. STARKOV, V. V. CHERKASHYNA**

## **OVERVOLTAGE COMPONENTS ON VOLTAGE TRANSFORMER DISPLACEMENT SCHEMES ELEMENTS**

The nonlinear dynamic mathematical model of the voltage transformer was considered and the overvoltages that occur on the elements of the voltage transformer simplified equivalent circuit during transients with a gradual complication of this system and the factors analysis affecting the magnitude of the overvoltage, duration, and other transient processes parameters are studied. The approximating advantages nonlinearity of voltage transformers with a hyperbolic sine are used. Mathematical expressions for calculating the parameters of transients and overvoltages that occur when disconnecting linear and nonlinear inductances from sources of constant and sinusoidal voltages are defined. The initial conditions influence and other factors on the transition process character is determined. It is proved that the possible overvoltages level on the inductor, the windings of voltage transformers is more dependent

© О. І. Ганус, К. О. Старков, В. В. Черкашина, 2019

on the ratio of the active load resistances of the inductor (or voltage transformer) and the winding itself, than on the load active resistance magnitude. The overvoltage maximum levels that occur when a voltage transformer is disconnected from a sinusoidal voltage source and their dependence on the disconnection moments are determined. It is proved that the most difficult case from the overvoltage view point values is when the switching on of an electric circuit with inductance occurs at a time when the induction transient component is forced to compensate for the maximum value of the constant mode induction, and the shutdown occurs half a period after switching on. The transition processes character for those cases where the previous transition process has not been fully completed is defined. Recommendations for the most efficient methods using for short-term load shunting of voltage transformers, which can best compensate for overvoltages during transients with non-zero initial conditions, have been developed. The analytical studies results were tested according to the recordings analysis results of fixing devices during emergency processes in the JSC «Kharkivoblenergo» electric networks and were used in the electric energy distribution system to select a specific voltage transformer for a specific electric network configuration.

**Keywords:** voltage transformer, nonlinearity, transient, induction, overvoltage, shunting, load, equivalent circuit, initial conditions, magnetic characteristics, ferroresonance, hyperbolic sine, hysteresis

**Введение.** Передача та розподіл електричної енергії споживачам України здійснюється електричними мережами різних номінальних напруг. Однією з найбільш істотних особливостей їх експлуатації є досить велика аварійність, значна частина якої викликана пошкодженнями трансформаторів напруги [1]. За результатами проведених у АТ «Харківобленерго» досліджень були визначені вимоги щодо підвищення надійності трансформаторів напруги при появі землі в електричних мережах з ізольованою нейтраллю, а саме – заходи з усунення умов виникнення ферорезонансних процесів у зазначених електричних мережах. Але, проблема залишилась. Крім того, підлягає вирішенню проблема усунення пошкоджуваності трансформаторів напруги в електричних мережах з іншими режимами заземлення нейтралі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У відомих роботах досліджені причини вигорання обмоток трансформаторів напруги: перенапруги, обумовлені ємнісними струмами замикання на землю; перенапруги, пов'язані з ферорезонансом; перенапруги, пов'язані з включенням трансформаторів на систему «холості шини» тощо та визначено рекомендації щодо підвищення їх надійності.

В [2] запропоновано здійснювати захист трансформаторів напруги шляхом короточасного підключення до їх вторинних обмоток низькоомного опору під час ферорезонансного процесу.

В [3] запропоновано використання трансформаторів напруги, підключених на лінійну напругу з ємнісним ділянкою між двома обмотками трансформатора напруги і землею.

В [4] досліджено впливу умов перехідних процесів в електричних мережах з ізольованою нейтраллю на характер пошкоджень трансформаторів напруги та визначено рекомендації щодо їх компенсації.

В [5] визначено вплив дрейфу магнітних характеристик трансформаторів напруги на характер протікання ферорезонансних процесів та визначено рекомендації з підбору трансформаторів напруги для конкретних електричних мереж.

В [6] визначені межі областей можливих згасаючого і незгасаючого ферорезонансних процесів в електричних мережах з ізольованою нейтраллю та визначено рекомендації щодо захисту трансформаторів напруги в кожній з зазначених областей.

Недостатня ефективність існуючих засобів захисту трансформаторів напруги під час виникнення

ферорезонансних процесів у [7] пояснюється тим, що аналітичні дослідження, покладені в основу їх розробки через спрощення, які зазвичай приймають під час моделювання нелінійних кіл за допомогою традиційних методів лінеаризації, призводять до відсутності в результатах аналізу небезпечних параметрів режимів, що наявні під час експлуатації трансформаторів напруги.

**Мета статті.** У [7] зазначено, що ферорезонансні явища в електричних колах при наявності котушки з феромагнітним осередком характеризуються складною динамікою через даний нелінійний елемент. Для цих процесів характерними є висока чутливість по відношенню як до початкових умов, так і до факторів впливу. У зв'язку з цим обґрунтовано, що спрощення, які приймають під час аналізу ферорезонансних кіл традиційними методами, можуть спричинити відсутності в теоретичних розв'язках певних режимів в реальних електричних мережах.

Мета статті полягає в розробці нелінійної динамічної математичної моделі для аналізу перехідних процесів в електромагнітних трансформаторах напруги та оцінювання комутаційних перенапруг у розподільних електричних мережах, які необхідні для підбору конкретного трансформатора напруги для певної електричної мережі.

**Основні матеріали дослідження.** З метою вирішення поставленого завдання досліджуємо перенапруги, що виникають на елементах самої спрощеної схеми заміщення трансформатора напруги, при перехідних процесах при поступовому ускладненні даної системи і аналізі чинників, що впливають на величину перенапруг, тривалість та інші параметри перехідних процесів.

Самою спрощеною схемою трансформатора напруги можливо вважати еквівалентну схему заміщення котушки з лінійною індуктивністю  $L$ , активним опором котушки  $R_1$  і навантаженням  $R_2$  (рис.1).

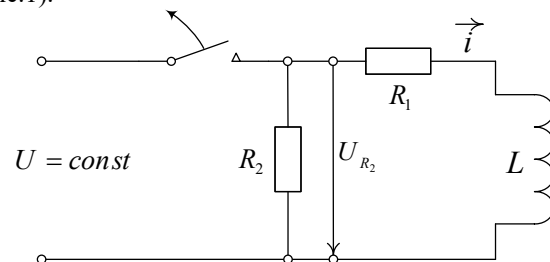


Рисунок 1 – Схема для дослідження перенапруг, що виникають при відключенні паралельно включених лінійної індуктивності і навантаження від джерела постійної напруги

Враховуючи те, що перехідні процеси містять вимушену і вільну складові досліджуємо перехідні процеси в розглянутих схемах як при комутаціях від змінного синусоїдального напруги так і від постійного.

Розглянемо перехідний процес відключення паралельно включених котушки з лінійною індуктивністю  $L$ , опором обмотки  $R_1$  і еквівалентного навантаження трансформатора напруги  $R_2$  від джерела постійної напруги  $U$ . Вважаємо, що зазначена навантаження трансформатора напруги носить чисто активний характер.

Миттєве значення струму в відключеному колі і напругу  $U_{R_2}$  на опорі  $R_2$  буде змінюватися за такими залежностями

$$i(t) = \frac{U}{R_1} e^{-\frac{R_1+R_2}{L}t}, \quad U_{R_2}(t) = U \frac{R_2}{R_1} e^{-\frac{R_1+R_2}{L}t}, \quad (1)$$

$$i(0) = \frac{U}{R_1}, \quad U_{R_2}(0) = U \frac{R_2}{R_1}. \quad (2)$$

Аналіз виразу (2) показав, що в момент відключення напруга на опорі навантаження, буде відрізнятися від напруги джерела  $U$ , яке до розмикання було докладено до моделі трансформатора напруги, в  $\frac{R_2}{R_1}$  рази. Виходячи з цього можливо зробити висновок

про те, що рівень можливих перенапруг на котушці індуктивності (як і на обмотках трансформаторів напруги) залежить не тільки від величини активного опору навантаження, як це прийнято у всіх відомих дослідженнях ([8] тощо), але, більшою мірою, від співвідношення активних опорів навантаження котушки індуктивності (або трансформатора напруги) і самої обмотки.

На наступному етапі розглянемо перехідний процес відключення котушки з лінійною індуктивністю  $L$  і опором обмотки  $R_1$  від джерела синусоїдальної напруги  $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$  (рис.2).

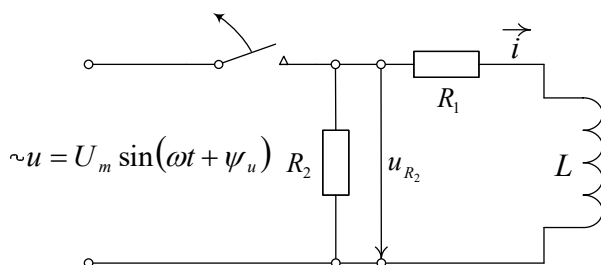


Рисунок 2 – Схема для дослідження перенапруг, що виникають при відключенні паралельно включених лінійної індуктивності і навантаження від джерела синусоїдальної напруги

За умови, що перехідна складова, пов'язана з включенням всього ланцюга до моменту відключення

загасне, напруга на навантаженні  $R_2$  після відключення дорівнюватиме:

$$u_{R_2}(t) = \frac{U_m R_2}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega t + \psi_u - \arctg \frac{\omega L}{R_1}) e^{-\frac{R_1+R_2}{L}t}. \quad (3)$$

Напругу на навантаженні  $R_2$  в момент відключення можливо визначити за наступним виразом:

$$u_{R_2}(0) = \frac{U_m R_2}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L)^2}} \sin(\psi_u - \arctg \frac{\omega L}{R_1}). \quad (4)$$

Напруга на навантаженні  $R_2$  буде максимальною в момент відключення за умови:

$$\psi_u - \arctg \frac{\omega L}{R_1} = \pm \frac{\pi}{2}. \quad (5)$$

Аналіз виразу (5) дозволяє дійти висновку про те, що в залежності від моменту відключення ( $\psi_u$ ) на навантаженні  $R_2$  може виникнути перенапруга, величина якої в  $\frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L)^2}}$  рази більше амплітуди напруги до відключення.

Більш складні процеси будуть мати місце в системі у разі використання в ній нелінійної індуктивності. За аналогією з попередніми дослідженнями розглянемо перенапруги, що виникають при відключенні нелінійної індуктивності від джерела постійної напруги в схемі, наведеній на рис. 3.

При виведенні співвідношень зневажаємо індуктивністю розсіювання, втратами на гістерезис та вихрові струми.

Згідно висновків, приведених у [9] нелінійність для прийнятого об'єкта дослідження найбільш адекватно апроксимувати гіперболічним синусом.

$$H = \alpha \sinh \beta B_d = \alpha \sinh B, \quad (6)$$

де  $H, B_d, \alpha, \beta$  - відповідно миттєве значення напруженості, дійсної індукції магнітного поля в осердді і коефіцієнти апроксимації, які для зазначеного об'єкта були обґрунтовані у [6];

$$B = \beta B_d.$$

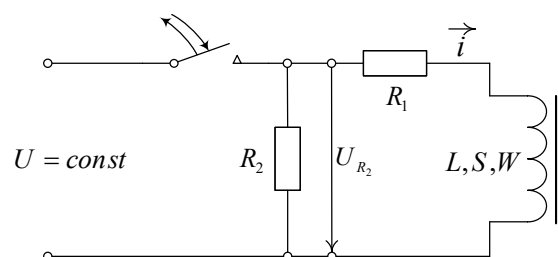


Рисунок 3 – Схема для дослідження перенапруг, що виникають при відключенні нелінійної індуктивності від джерела постійної напруги

Рівняння електричного кола до відключення від джерела постійної напруги  $U$ , згідно прийнятих на рис. 3 позначень, буде мати вигляд:

$$\frac{dy}{dt} + a(y^2 - I) = by, \quad (7)$$

$$\text{де } y = e^b, \quad a = \frac{R_1 \alpha \beta l}{2SW^2}, \quad b = U \frac{\beta}{SW}$$

Рішення рівняння (7) матиме вигляд:

$$y = e^b = \frac{y_1 e^{a(y_1 - y_2)t} - y_2 C}{e^{a(y_1 - y_2)t} - C}, \quad (8)$$

де  $y_1, y_2$  – корені рівняння

$$ay^2 - by - a = 0. \quad (9)$$

Рішення (8) рівняння (7) при початкових умовах

$$i(0) = B(0) = 0 \quad y(0) = I$$

буде мати вигляд

$$y = e^b = \frac{y_1(y_2 - I)e^{a(y_1 - y_2)t} - y_2(y_1 - I)}{(y_2 - I)e^{a(y_1 - y_2)t} - (y_1 - I)}, \quad C = \frac{y_1 - I}{y_2 - I}. \quad (10)$$

Згідно (10) згасання вільної складової визначається виразом:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{-a(y_1 - I)(y_2 - I)(y_1 - y_2)^2 e^{a(y_1 - y_2)t}}{[(y_2 - I)e^{a(y_1 - y_2)t} - (y_1 - I)] \cdot [y_1(y_2 - I)e^{a(y_1 - y_2)t} - y_2(y_1 - I)]}, \quad (11)$$

достовірність якого підтверджується дотриманням початкових умов:

$$\left. \frac{dB}{dt} \right|_{t=0} = \frac{U\beta}{SW} = b \quad \left. \frac{dB}{dt} \right|_{t \rightarrow \infty} = 0. \quad (12)$$

Тому, вираз для миттєвого значення струму в нелінійній індуктивності згідно (11) буде мати вигляд:

$$i(t) = \frac{U}{R_1} + \frac{SW}{R_1 \beta} \times \frac{a(y_1 - I)(y_2 - I)(y_1 - y_2)^2 e^{a(y_1 - y_2)t}}{[(y_2 - I)e^{a(y_1 - y_2)t} - (y_1 - I)] \cdot [y_1(y_2 - I)e^{a(y_1 - y_2)t} - y_2(y_1 - I)]}. \quad (13)$$

Згідно (13) у момент включення і в сталому режимі:

$$i(0) = 0 \quad i(\infty) = \frac{U}{R_1}. \quad (14)$$

Рівняння електричного кола після відключення нелінійної індуктивності від джерела постійної напруги  $U$  має вигляд:

$$\frac{dy}{dt} + a(y^2 - I) = 0, \quad (15)$$

$$\text{де } y = e^B,$$

$$a = \frac{(R_1 + R_2)\alpha\beta l}{2SW^2}.$$

Рішення рівняння (15) має вигляд:

$$y = e^B = \frac{e^{2at} + C}{e^{2at} - C}. \quad (16)$$

Враховуючи те, що  $i_0, B_{0D}$  – відповідно миттєве значення струму і індукція магнітного поля в нелінійній індуктивності в момент відключення  $t_0$ , можливо записати:

$$\beta B_{0D} = B_0 = \text{arsh} i_0 \frac{W}{\alpha l}. \quad (17)$$

Рішення рівняння (16) при початкових умовах  $y_0 = e^{B_0}$  буде мати вигляд:

$$y = \frac{(y_0 + I)e^{2at} + (y_0 - I)}{(y_0 + I)e^{2at} - (y_0 - I)} \quad C = \frac{y_0 - I}{y_0 + I}. \quad (18)$$

Виходячи з (18) можливо визначити:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{-4a(y_0 + I)(y_0 - I)e^{2at}}{[(y_0 + I)^2 e^{4at} - (y_0 - I)^2]}. \quad (19)$$

Вираз для миттєвого значення струму після відключення нелінійної індуктивності від джерела постійної напруги  $U$  згідно (19) буде мати вигляд:

$$i(t) = \frac{4SWa(y_0 + I)(y_0 - I)e^{2at}}{\beta(R_1 + R_2)[(y_0 + I)^2 e^{4at} - (y_0 - I)^2]}. \quad (20)$$

Згідно (20) у момент відключення і в сталому режимі:

$$i(t_0) = i_0, \quad i(\infty) = 0. \quad (21)$$

Якщо до моменту відключення ( $t_0$ ) перехідний процес, пов'язаний із включенням всієї схеми не був загашений, тоді струм визначається за виразом  $i_0 = U/R_1$ . У першому і в другому випадках напруга на  $R_2$  визначаються відповідно за формулами:

$$u_{R_2}(t_0) = i_0(t_0)R_2, \quad u_{R_2}(0) = U \frac{R_2}{R_1}. \quad (22)$$

Досліджуємо перенапруги, що виникають при відключенні нелінійної індуктивності від джерела синусоїдальної напруги  $u = U_m \sin(\alpha t + \psi_U)$  в схемі, наведений на рис. 4.

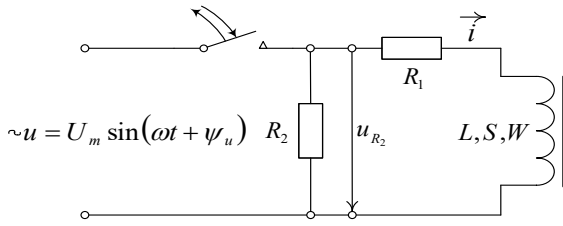


Рисунок 4 – Схема для дослідження перенапруг, що виникають при відключенні нелінійної індуктивності від джерела синусоїдальної напруги.

Рівняння електричної ланки до відключення буде мати вигляд:

$$\frac{dy}{dt} + a(y^2 - I) = by \sin(\alpha t + \psi_U). \quad (23)$$

Запишемо рівняння (23) в асимптотичному вигляді:

$$\frac{db}{dt} + ashB = b \sin(\alpha t + \psi_U), \quad (24)$$

де

$$B = \beta B_d, a = \frac{R_1 \alpha \beta}{SW_2}, b = \frac{U_m \beta}{SW}. \quad (25)$$

Рішення рівняння (24) для сталого режиму визначається у вигляді першої гармоніки індукції магнітного поля в осердді:

$$B = B_m \sin(\alpha t + \psi), B_m = B_{mU} \beta. \quad (26)$$

Гармоніками вищих порядків припустимо зневажити, тому вони в недостатній мірі впливають на точність через те, що в ланцюгах зі сталлю при синусоїдальній напрузі джерела індукція магнітного поля в осердді найбільш близька до гармонійної функції (у порівнянні з струмом).

З урахуванням (6) миттєве значення струму в сталому режимі дорівнює:

$$i(t) = \frac{\alpha L}{W} sh[B_m \sin(\alpha t + \psi)] \quad (27)$$

Припустимо, в момент відключення  $t_0$  індукція магнітного поля в осердді дорівнює  $B(t_0) = B_m \sin(\alpha t_0 + \psi)$ , тоді, напруга в даній схемі на опорі  $R_2$ , згідно (20) буде змінюватися у відповідності з наступним виразом:

$$u_{R2}(t) = \frac{2\alpha L}{W} R_2 \left[ \frac{(y_0 + I)(y_0 - I)e^{2at}}{(y_0 + I)^2 e^{4at} - (y_0 - I)^2} \right], \quad (28)$$

де

$$y_0 = \exp[B_m \sin(\alpha t_0 + \psi)] \quad (29)$$

У момент відключення напруги на опорі  $R_2$ , згідно (27), (28) дорівнюватиме:

$$u_{R2}(t_0) = \frac{\alpha L R_2}{W} sh[B_m \sin(\alpha t_0 + \psi)] \quad (30)$$

Напруга на опорі  $R_2$  буде максимальним в тому випадку, якщо відключення нелінійної індуктивності від джерела синусоїдальної напруги сталося в момент часу відповідний  $\alpha t_0 + \psi = \pi / 2$ . В цьому випадку:

$$U_{R2max} = \pm R_2 \frac{\alpha L}{W} sh 2B_m. \quad (31)$$

Аналіз останніх виразів дозволяє зробити висновок про те, що найбільш важким випадком з точки зору величин перенапруг є той, при якому включення електричного ланцюга відбувається в момент часу, коли перехідна складова індукції змушена компенсувати максимальне значення індукції сталого режиму, а відключення відбувається через пів періоду після включення, що знайшло підтвердження по результатам аналізу записів фіксуючих пристроїв під час аварійних процесів у електричних мережах АТ «Харківобленерго». У цьому випадку індукція магнітного поля в осердді може досягти приблизно подвоєного значення. З цієї причини використання методів з короткочасного шунтування навантаження трансформаторів напруги найбільш ефективно в тих випадках, коли відключення трансформаторів напруги відбувається в моменті часу, при яких попередній перехідний процес (наприклад, попереднього включення зазначеного напруги) ще повною мірою не завершений, і мають місце не нульові початкові умови.

#### Висновки:

1. Визначено математичні вирази для обчислення параметрів переходних процесів і перенапруг, що виникають при відключенні лінійних і нелінійних індуктивностей від джерел постійного і синусоїдального напруги.

2. Обґрунтовано висновок про те, що рівень можливих перенапруг на котушці індуктивності, обмотках трансформаторів напруги залежить не тільки від величини активного опору навантаження, але, більшою мірою, від співвідношення активних опорів навантаження котушки індуктивності (або трансформатора напруги) і самої обмотки.

3. Обґрунтовано висновок про те, що в залежності від моменту відключення на навантаженні може виникнути перенапруга, величина якої в  $\frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L)^2}}$

рази більше амплітуди напруги до відключення джерела синусоїдальної напруги.

4. Доведено, що найбільш важким випадком з точки зору величин перенапруг є той, при якому включення електричного ланцюга з індуктивністю відбувається в момент часу, коли перехідна складова індукції змушена компенсувати максимальне значення індукції сталого режиму, а відключення відбувається через пів періоду після включення.

5. Розроблено рекомендацію щодо найбільш ефективного використання методів з короткочасного

шунтування навантаження трансформаторів напруги, які найкраще всього можуть ефективно компенсувати перенапруги при перехідних процесах з ненульовими початковими умовами.

#### Список литературы

1. Ганус А.И., Старков К.А. Повреждаемость трансформаторов напряжения в областных электрических сетях АК «Харьковоблэнерго» и мероприятия по её снижению // Світлотехніка та електроенергетика. Харків: ХНАМГ. – 2003. - № 1. с.75-81.
2. Журахівський А.В., Кенс Ю.А., Горбатський А.А. Моделювання та розробка пристроїв захисту трансформаторів напруги 6.35 кВ // Вісник НУ «Львівська політехніка». – 2000. – № 403 – С. 51-55.
3. Журахівський А.В., Кенс Ю.А., Варецький Ю.О., Медінський Р.В. Нерезонуючі трансформатори напруги для мереж з ізольованою нейтраллю // Новини енергетики. – 2000. – № 6. – С. 37-40.
4. Ганус А.И., Старков К.А. Влияние условий переходных процессов в электрических сетях 6-10 кВ на характер повреждений трансформаторов напряжения // Энергетика та електрифікація. – 2006. – № 2. – С. 5-12.
5. Говоров Ф.П., Ганус А.И., Старков К.А. Влияние дрейфа магнитных характеристик трансформаторов напряжения 6(10) кВ на характер протекания феррорезонансных процессов // Техническая электродинамика, тематический выпуск: "Силовая электроника и энергоэффективность". – 2006. – ч. 5. – С. 94-99.
6. Ганус А.И. Экспериментальное определение границ областей возможных затухающего и незатухающего феррорезонансных процессов в электрических сетях с изолированной нейтралью с трансформаторами напряжения // Светотехника и электроэнергетика. – 2006. – № 7-8. – С. 77-85.
7. Тугай Ю.І., Ганус О.І., Старков К.О. Комутаційні перенапруги у трансформаторах напруги // Технічна електродинаміка – 2016. - № 5. – с. 73-75.
8. Журахівський А.В., Кенс Ю.А., Равлик О.М., Медінський Р.В. Захист трансформаторів напруги від надструмів під час дугових замикань фази на землю в мережі 10 кВ з ізольованою нейтраллю // Энергетика и Електрифікація. – 2001. - №6. С.21-26.
9. Ганус О.І., Говоров П.П., Старков К.О. Überspannung in elektrischen Netzen mit Spannungswandlern. Effizienz von Geräteschutzmaßnahmen (Перенапруги в електричних мережах з трансформаторами напруги. Ефективність заходів з захисту Поступила (received) 10.08.2019

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Ганус Олексій Іванович (Ганус Алексей Иванович, Ganus Alexey Ivanovich)** – кандидат технічних наук, технічний директор АТ «Харківобленерго», м. Харків; тел. (057) 740-15-13; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2935-8674>; e-mail: [hanus.oleksii@obl.kh.energy.gov.ua](mailto:hanus.oleksii@obl.kh.energy.gov.ua)

**Старков Костянтин Олександрович (Старков Константин Александрович, Starkov Konstantin Alexandrovich)** – кандидат технічних наук, головний фахівець - начальник сектору з електротехнічних питань управління виробничо-технічної політики та нагляду за експлуатацією обладнання АТ «Харківобленерго», м. Харків; тел. (057) 740-12-68; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9443-9484>; e-mail: [ptul@obl.kh.energy.gov.ua](mailto:ptul@obl.kh.energy.gov.ua)

**Черкашина Вероніка Вікторівна (Черкашина Вероника Викторовна, Cherkashyna Veronika Viktorivna)** – доктор технічних наук, доцент кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5639-9722>; e-mail: [veronika2473@gmail.com](mailto:veronika2473@gmail.com).

обладнання) // Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 336 с.

#### References (transliterated)

1. Ganus A.I., Starkov K.A. Povrezhdayemost' transformatorov napryazheniya v oblastnykh elektricheskikh setyakh AK «Khar'kovoblenergo» i meropriyatiya po yeyo snizheniyu // Svitlotekhnika ta yelektroyenergetika. Kharkiv: KHNAMG. – 2003. - № 1. s.75-81.
2. Zhurakhivs'kyi A.V., Kens YU.A., Horbat's'kyi A.A. Modelyuvannya ta rozrobka prystroyiv zakhystu transformatoriv napruhy 6.35 kV // Visnyk NU "Lvivs'ka politekhnika". – 2000. – № 403 – S. 51-55.
3. Zhurakhivs'kyi A.V., Kens YU.A., Varets'kyi YU.O., Medyn's'kyi R.V. Nerezonuyuchi transformatory napruhy dlya merezh z izol'ovanoyu neytrallyu // Novyny enerhetyky. – 2000. – № 6. – S. 37-40.
4. Ganus A.I., Starkov K.A. Vliyanie usloviy perekhodnykh protsessov v elektricheskikh setyakh 6-10 kV na kharakter povrezhdeniy transformatorov napryazheniya // Yenergetika ta yelektifikatsiya. – 2006. – № 2. – S. 5-12.
5. Govorov F.P., Ganus A.I., Starkov K.A. Vliyanie dreyfa magnitnykh kharakteristik transformatorov napryazheniya 6(10) kV na kharakter protekaniya ferrozonansnykh protsessov // Tekhnicheskaya elektrodinamika, tematicheskii vypusk: "Silovaya elektronika i energoeffektivnost'". – 2006. – ch. 5. – S. 94-99.
6. Ganus A.I. Eksperimental'noye opredeleniye granits oblastey vozmozhnykh zatukhayushchego i nezatukhayushchego ferrozonansnykh protsessov v elektricheskikh setyakh s izolirovannoy neytral'yu s transformatorami napryazheniya // Svetotekhnika i elektroenergetika. – 2006. – № 7-8. – S. 77-85.
7. Tuhay Yu.I., Hanus O.I., Starkov K.O. Komutatsiyni perenapruhy u transformatorakh napruhy // Tekhnichna elektrodynamika – 2016. - № 5. – s. 73-75.
8. Zhurakhivs'kyi A.V., Kens YU.A., Ravlyk O.M., Medyn's'kyi R.V. Zakhyst transformatoriv napruhy vid nadstrumiv pid chas duhovyykh zamykan' fazy na zemlyu v merezhi 10 kV z izol'ovanoyu neytrallyu // Enerhetyka y Elektrifykatsyya. – 2001. - №6. S.21-26.
9. Hanus O.I., Govorov P.P., Starkov K.O. Überspannung in elektrischen Netzen mit Spannungswandlern. Effizienz von Geräteschutzmaßnahmen (Perenapruhy v elektrychnykh merezhakh z transformatoramy napruhy. Efektyvnist' zakhodiv z zakhystu obladnannya) // Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 336 s.